



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

PÍSTY ČTYŘDOBÝCH SPALOVACÍCH MOTORŮ A JEJICH APLIKACE

THE PISTONS OF FOUR-STROKE ENGINES AND THEIR APPLICATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Jelínek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jozef Dlugoš

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **David Jelínek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jozef Dlugoš**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Písty čtyřdobých spalovacích motorů a jejich aplikace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Písty čtyřdobých motorů mají dlouhou historii, během které se vyvinula různá konstrukční řešení nebo použité materiály, které našly uplatnění v odlišných aplikacích. Vývojové trendy reprezentují možnosti doby a jejich pečlivým studiem je možné predikovat trend budoucích vylepšení.

Cíle bakalářské práce:

Úvod do problematiky pístů čtyřdobých spalovacích motorů.
Historické řešení pístů čtyřdobých spalovacích motorů a jejich aplikace.
Soudobé písty čtyřdobých spalovacích motorů, jejich aplikace a moderní trendy.
Zhodnocení a a odhad vývojových trendů v konstrukci pístů.

Seznam doporučené literatury:

MAHLE GmbH. Pistons and engine testing: With 269 illustrations and 20 tables. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012. ISBN 978-383-4815-903.

KOŠTÁL, Jan a SUK, Bohuslav. Pístové spalovací motory. Praha: Československá akademie věd, 1963.

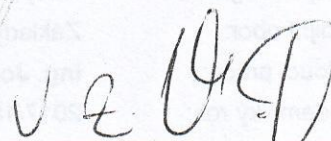
KOŽOUŠEK, Josef. Výpočet a konstrukce spalovacích motorů. II. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1983.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 1. 11. 2017



prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce pojednává o historickém vývoji pístů pro čtyřdobé spalovací motory a jejich aplikaci pro stroje využívající jak vznětového, tak i zážehového principu.

Nejprve je vysvětleno, jak funguje čtyřdobý spalovací motor a jakou úlohu v něm píst sehrává. Následuje popis jednotlivých částí pístu, důležitých vlastností, které by měl píst splňovat a je popsáno, jak je píst, při procesu spalování, zatěžován.

Další část se zabývá historickým vývojem pístu a to zejména v první polovině 20. století, kdy spalovací motory měly největší vzestup. Jsou zde uvedeny konstrukční způsoby, druhy využívaných materiálů a je zmíněn i Wankelův motor.

Následuje shrnutí novodobých způsobů výroby pístů, jejich typy, druhy materiálů, povlakování a způsoby chlazení.

Klíčová slova

píst, typy pístů, materiály pístů, chlazení pístů, historie pístů, Wankelův motor

Abstract

This thesis deals with historical development of pistons for four-stroke combustion engines and their application for machines using both diesel and petrol fuel.

The beginning explains how the four-stroke combustion engines works and what role the piston plays that. The following is about the description of the individual parts of the piston, the important attribute the piston should have and how the piston is loaded by the forces in the combustion process.

The next part deals with the historical development of the piston, especially in the first half of the 20th century, when the combustion engines had the greatest rise. In this chapter are summarized the design methods, the types of material and the Wankel engine.

Below is a summary of the modern methods of producing pistons, their types of use, types of materials, coatings and cooling methods.

Key words

piston, piston types, piston's materials, piston cooling, history of piston, Wankel's engine

Bibliografická citace

JELÍNEK, D. *Písty čtyřdobých spalovacích motorů a jejich aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jozef Dlugoš.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jozefa Dluhoše a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 1. května 2018

.....

.....

David Jelínek

Poděkování

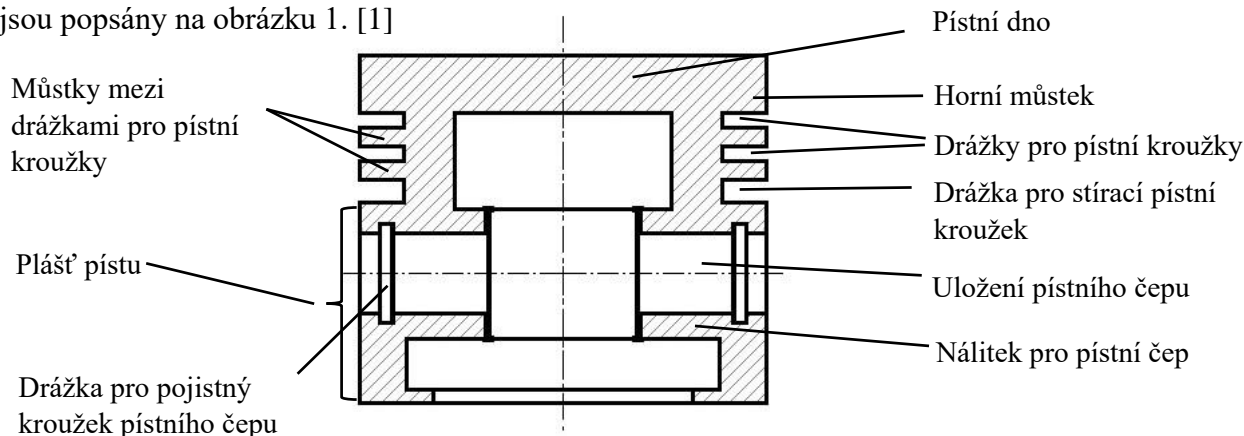
Děkuji vedoucímu práce panu Ing. Jozefu Dlugošovi a pánům Janu Janečkovi z firmy *Rheinmetall* a Pavlu Šerclovi z firmy *Motorářská strojírna Šercl* za cenné informace, připomínky a rady ohledně mé bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat mé rodině a mým přátelům za finanční a morální podporu.

Obsah

1	Úvod do problematiky	9
2	Historie pístů	11
2.1	Parní stroje	11
2.2	Spalovací motory	12
2.2.1	Počátek vznětových motorů	13
2.3	Konstrukce pístů	16
2.3.1	Invarový píst	19
2.4	Materiály	20
2.4.1	Litinové písty	20
2.4.2	Hliníkové písty	20
2.4.3	Elektronové písty	21
2.5	Období 2. světové války	22
2.6	Wankelův motor	24
3	Dnešní písty	25
3.1	Typy pístů	26
3.1.1	Písty pro čtyřdobé benzínové motory	26
3.1.2	Písty pro čtyřdobé naftové motory	27
3.1.3	Písty složené	28
3.2	Materiály pístů	29
3.2.1	Hliníkové písty	29
3.2.2	Železné materiály	31
3.3	Povlakování	34
3.4	Chlazení pístů	34
3.5	Píst pro 1,5l TSI EVO - VW EA211	36
	Závěr	37
	Použité zdroje	38
	Seznam použitých symbolů a zkratek	38
	Seznam příloh	40

1 Úvod do problematiky

Píst tvoří společně s válcem spalovací prostor motoru. Jeho úlohou je převod energie ve formě tepla získaného spalováním paliva na mechanickou práci. Za pomoci ojnice se translační pohyb pístu mění na rotační pohyb klikové hřídele. Tento rotační pohyb je dále přes převodové ústrojí přenášén na kola automobilu. Jednotlivé části pístu jsou popsány na obrázku 1. [1]



Obrázek 1 - Píst a jeho popis [14]

U zážehových čtyřdobých motorů se na jedné otáčce klikové hřídele podílí 4 stádia pohybu pístu:

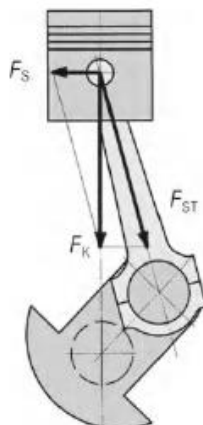
1. sání – do spalovacího prostoru se nasaje směs paliva a vzduchu,
2. komprese – nasátá směs se pístem stlačí,
3. expanze – zážehnutím paliva dojde k výbuchu a vzniku tepla,
4. výfuk – dochází k výfuku spalin ze spalovacího prostoru.

Tento cyklus 4 fází se opakuje až 19000x za minutu (Formule 1). Je tedy zřejmé, že píst bude jednou z nejvíce mechanicky i tepelně namáhaných součástí motoru. Písty a materiály, ze kterých jsou vyrobeny, proto musí splňovat určitá kritéria:

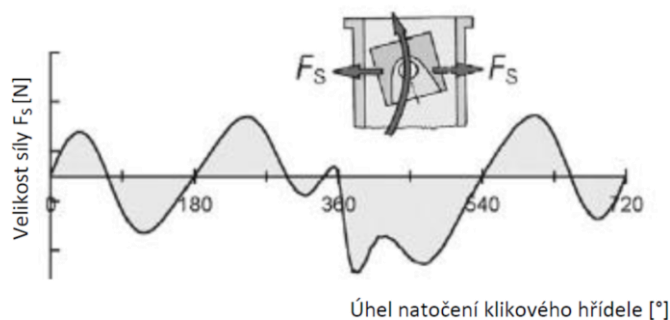
- nízká teplotní roztažnost,
- žáruvzdornost,
- dobrá tepelná vodivost,
- přizpůsobivost provozním podmínkám,
- nízká hmotnost,
- vysoká pevnost,
- celková rozměrová stálost,
- odolnost vůči otěru, opotřebení a únavě,
- korozivzdornost,
- nízká spotřeba oleje,
- dobrá obrobiteľnosť,
- nízká pořizovací cena,
- ekologicky nezávadná výroba.

Píst je zatěžován tlakovou silou způsobenou výbuchem směsi paliva a vzduchu, což zajišťuje jeho pohyb. Tuto sílu označíme jako F_K . Její nositelka prochází osou válce. Tato síla se rozkládá do dvou složek označené F_{ST} a F_S . Síla F_{ST} naznačuje interakci mezi pístem a ojnici a zajišťuje pohyb klikové hřídele, tudíž je tento průmět účinnou složkou síly F_K . Síla F_S je normálovou složkou síly F_K a způsobuje horizontální pohyb pístu ve válci, který je umožněn vůlí mezi pístem, pístními kroužky a vnitřní stěnou válce. Tato síla během cyklu mění svůj

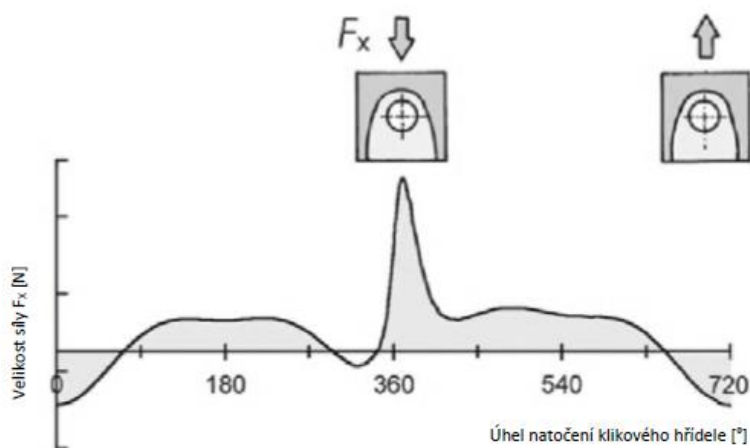
směr i velikost a způsobuje tření, mezi válcem a pístem. Proto je důležité píst dostatečně promazávat. Pro lepší názornost jsou uvedeny obrázky 2 až 4. [1,2]



Obrázek 2 - Rozložení sil na pístu [2]



Obrázek 3 - Závislost síly F_s na natočení klikového hřídele [2]



Obrázek 4 - Závislost síly F_x na natočení klikového hřídele [2]

2 Historie pístů

2.1 Parní stroje

Úvodem uvedme základní informace o pístech v parních strojích. Spalovací motory vycházejí z parních strojů, proto mezi nimi můžeme najít některé podobnosti. Tyto podobnosti se týkají i pístů.

Nejprve se u parních strojů využíval píst pevně spojen s pístnicí, který se nacházel ve válci (vizte obrázek 5). Konec pístnice byl upevněn v křížáku, který pomocí ojnice transformuje posuvný pohyb pístu a pístnice v otáčivý pohyb klikového hřídele. Díky tomu, že křížák přenáší šikmé síly, může se pístu značně zkrátit nebo úplně odebrat pístní plášť. Také válec je méně zatěžován a odírán.



Obrázek 5 - Pístnice parního stroje

Objevily se však i parní stroje se stejným mechanismem jako u spalovacích motorů. Tyto písty musely mít dlouhé pístní pláště a využívaly větší počet pístních kroužků. Tyto písty byly, stejně jako první písty spalovacích motorů, vyráběny z litiny. Pro příklad jsou uvedeny obrázky 6 a 7.

Parní stroje se postupem času vytrácely z dopravy, ale v průmyslu se využívaly až do konce 20. století. Průmyslové parní stroje byly stabilní (pevně spojeny s podlahou) a k výrobě páry se využívala různá paliva.



Obrázek 6 - Píst naftového parního stroje



Obrázek 7 - Píst parního stroje na dřevěné palivo

*Obrázek 8 – Stacionární parní stroj na naftu**Obrázek 9 – Stacionární parní stroj na dřevěné palivo*

2.2 Spalovací motory

U spalovacích motorů není z důvodu velikosti (mobility) a rychlosti otáček možnost využívat stejných pístů jako u parních strojů. Písty spalovacích motorů v sobě tedy musí zkombinovat jak píst a pístnici (přímočarý pohyb), tak i křížák (rotační pohyb). Právě kvůli nahrazení křížáku má píst dlouhý plášť, aby se zamezilo většímu opotřebení válce a aby byl tlak na stěnu válce/strany pístu rozdělen na co možná největší plochu. V automobilových motorech se používala délka 1,33x větší, než byl průměr pístu. Zprvu se písty vyráběly stejně jako u parních strojů z šedé litiny, která má skvělé tepelně-roztažné vlastnosti a zároveň vysokou tvrdost a pevnost, což přispívalo k nízkému opotřebení pístu. Tento materiál byl však z důvodu vysoké hmotnosti a horší tepelné vodivosti již na počátku automobilismu nahrazován lehkými slitinami. [3]

Po první světové válce se automobily stávaly dostupnější pro širokou veřejnost. Zatímco americká ekonomika vzrůstala (především automobilový průmysl), německá ekonomika trpěla. Tato situace se projevila i ve vývoji motorů a pístů. Americké automobily využívaly motory s velkým zdvihovým objemem (400 kg hmotnosti vozidla na 1 dm³). V Německu byla zavedena daň, která se odvíjela od objemu motorů vozidla. Proto se začaly využívat motory s menším zdvihovým objemem (600–700 kg hmotnosti vozidla na dm³). Aby tyto motory byly schopny provozu, docházelo ke změně kompresních poměrů a písty musely mít vyšší rychlost (zvýšení výkonu změnou otáček). Při zvýšení otáček jsou rozhodující spíše setrvačné síly než pracovní tlaky ve válci. Po prohře Německa v první světové válce byl navíc zakázán vývoj letadel. Z těchto důvodů se hliníkové písty, které doposud sloužily pro letadlové motory a závodní speciály, začaly používat i do osobních automobilů pro širokou veřejnost. [4]

Pro názornost si uvedme 3 písty se stejným průměrem 80 mm. Hmotnost pístu z šedé litiny je 730 g, z lehké slitiny využívané v roce 1943 je 400 g a hmotnost elektronového pístu (hořčíková slitina), využívaného pro závodní automobily, je 220 g. [3]

Objevily se i pokusy snížit hmotnosti litinových pístů a to přidáním mědi a zdokonalením slévárenských metod. Díky těmto opatřením bylo možno vyrábět litinové písty s tenčími stěnami. Takovéto písty měly o 100 g menší hmotnost než ty dříve používané. Je jasné, že i takto odlehčené litinové písty se nemohly s písty z lehkých slitin srovnávat. Navíc se zmenšením průřezu materiálu se zmenší i teplotní vodivost a píst se tedy hůře ochlazuje (více zahřívá). Roku 1935 byl vyvinut píst z litiny, který měl stejnou hmotnost jako píst z lehké slitiny. Tyto písty se však nehodí do vysoce namáhaných a rozměrných motorů. Proto se další vývoj týkal především pístů z lehkých slitin a litinové písty postupně upadaly. [4]

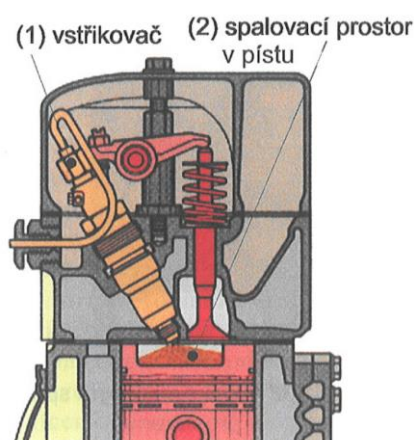
Než však hliníkové písty nahradily ty litinové, museli inženýři vyřešit problémy vzniklé odlišnostmi materiálu. Jelikož první hliníkové písty vycházely z nákresů litinových, nastaly problémy s roztažností pístu při chodu motoru. Hliníkové písty měly větší nárůst objemu při zvýšené teplotě, proto byla zvolena větší vůle mezi pístem a válcem, což vedlo k zvýšení hluku motoru a většímu opotřebení pístů a pístních kroužků. Navíc byl problém s přesnou výrobou pístů, protože byly vyráběny v malých dílnách, které nedokázaly zaručit požadovanou přesnost. Právě kvůli nepříjemnému hluku motoru s hliníkovými písty se tyto motory nejprve využívaly pro nákladní a užitkové automobily. Zároveň nastaly problémy z důvodu rozšíření vznětových motorů a upravením hliníkových pístů pro tyto motory. [4]

2.2.1 Počátek vznětových motorů

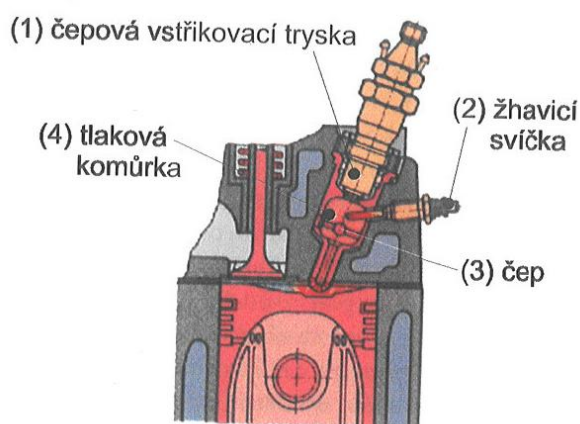
Vznětové motory lze dle způsobu dopravy paliva do válce rozdělit na dva typy.

Jedním z nich je přímé vstřikování do válce (vizte obrázek 10). Tento způsob vynalezl roku 1910 pan James McKechnie, který zavedl vstřikování pomocí vysokotlakého čerpadla s hydraulickým řízením. Tímto způsobem bylo palivo vstřikováno pod tlakem až 400 barů. Dalším významným mužem, který se zasloužil o zavedení přímého vstřikování do válce, je Hugo Junkers. Tento německý inženýr se zabýval i motory zážehovými a nejvíce je spojován s výrobou letadel. [4]

Druhý způsob se nazývá komůrkový (vizte obrázek 11). U motorů s tímto způsobem vstřikování je palivo vstříknuto do komůrky před spalovacím prostorem, kde se smísí se vzduchem a až po otevření sacího ventilu je celá směs nasáta do spalovacího prostoru. Tento způsob přípravy směsi vynalezl německý inženýr Prosper L'Orange, který je spojován s firmami Benz nebo Motoren Werke Mannheim AG (MWM). [4]



Obrázek 10 – Schéma přímého vstřikování [1]



Obrázek 11 – Schéma vstřikování do komůrky [1]

O rozšíření vznětových motorů se zasloužil Robert Bosch. Díky jeho mechanicko-hydraulickému zařízení na vstřikování paliva se vznětové motory velice zjednodušily a mohly být vyráběny sériově. [9]

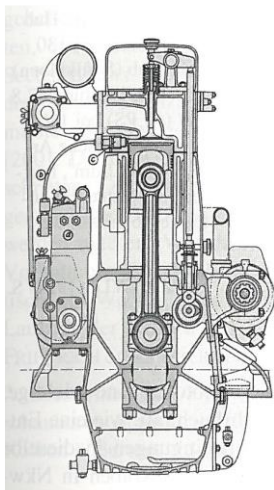
Přestože je komůrkový způsob tvorby směsi složitější, stal se rozšířenější z důvodu nižších provozních nákladů a vyšší teplotní účinnosti. Pouze Junkers s firmou MAN založili své motory na způsobu vstřikování přímo do válce. [4]

Písty vznětových motorů byly více namáhány tlakově i teplotně. U komůrkové metody zasahovaly spalovací trysky na úzce vymezené plochy pístní koruny, čímž se prudce ohřívaly. Zatímco u metody s přímým vstřikováním je velká část kompresního prostoru umístěna v pístu, což pístní korunu silně namáhá teplotně i tlakově. Z těchto důvodů bylo obtížnější přejít na lehké slitiny. Protože však znalosti vycházely ze zážehových motorů, byly vznětové motory nedokonalé a jejich největší vývoj probíhal až ve 20. letech 20. století. [4]

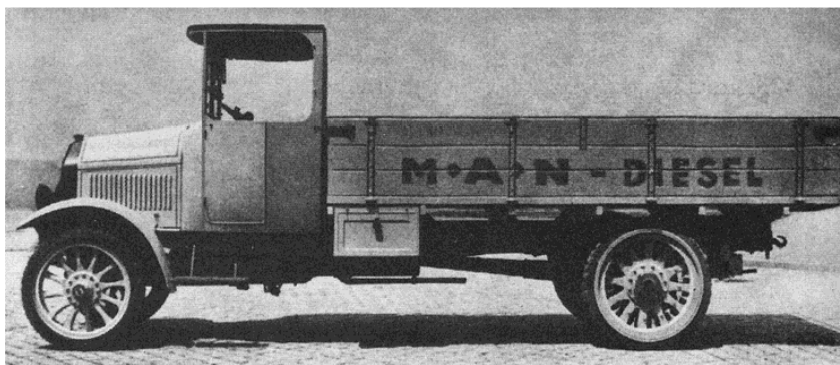
V Německu se o vývoj vznětových motorů nejvíce zasloužily firmy MAN, Benz a Junkers. [4]

Firma Junkers přišla po několika návrzích s motorem 4 HK 100 s výkonem 100kW, které se montovaly do letadel. [4]

Roku 1923 představila firma MAN motor s názvem W4V 11/18, což byl motor s přímým vstřikováním a výkonem 33 kW a montoval se do užitkového automobilu značky MAN, který je vyfocen na obrázku 13. Tyto motory byly vybaveny čtyřmi hliníkovými písty s litinovými výztuhami. Schéma motoru je zobrazeno na obrázku 12. Objem motoru byl 7,5 l a hmotnost 490 kg. [4]

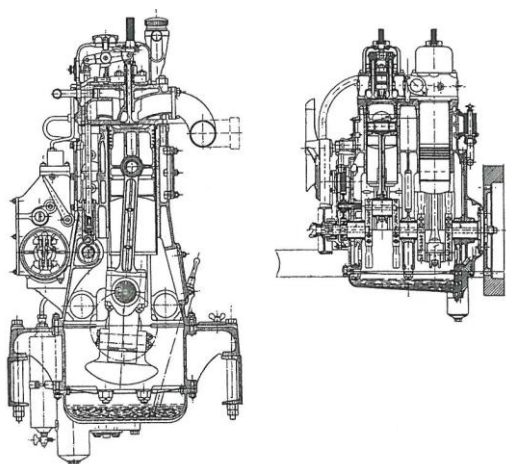


Obrázek 12 – Motor W4V 11/18 [4]



Obrázek 13 – První nákladní vozidlo s dieselovým motorem s přímým vstřikováním - MAN Sauer [5]

Ten samý rok představila firma Benz svůj motor OB 2 s komůrkovým typem sání. Tento motor, s výkonem až 37 kW, se nejprve montoval do zemědělského pluhu (vizte obrázek 15) a později i do užitkových vozidel. Motor OB 2 měl 4 válce vrtané na průměr 125 mm a celkový objem motoru byl 8868 cm³. [4,6]



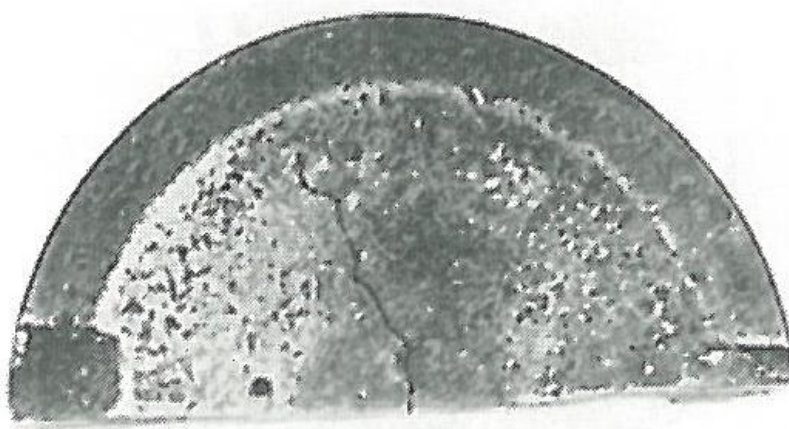
Obrázek 14 – Motor OB 2 [4]



Obrázek 15 – Zemědělský pluh s motorem OB 2 [6]

Písty do tohoto motoru byly z šedé litiny, které však pro následující šestiválcový motor OM 5 již nebyly dostačující. Jelikož v té době měly zážehové motory vyšší výkon, přišla firma Benz s šestiválcovým motorem OM 5 s výkonem 51,3 kW. Nejprve do něj montovali písty z šedé litiny, ale jak se ukázalo, tak proudění tepla z komůrky silně ohřívalo části pístní koruny a kvůli nízké tepelné vodivosti litiny vznikaly praskliny. Obrázek 16 ukazuje praskliny v pístní koruně. Tím se životnost motoru výrazně snížila na hodnotu 5 000 až 10 000 ujetých kilometrů. [4]

Toto byl důvod, proč se začaly využívat písty s pláštěm z hliníkových slitin a ocelovou pístní korunou. I u těchto pístů se však nevyřešil problém s chlazením, proto byly velice brzy nahrazeny Nelsonovými, invarovými hliníkovými písty od firmy Bohnalite (vizte kapitolu 2.3.1). Díky těmto pístům se životnost zdvojnásobila, ale další problém nastal s vysokým opotřebením převážně první drážky pro pístní kroužek. Řešení tohoto problému našel pan Ernst Mahle, který přišel s vylepšením zalitého nosiče do drážek pro pístní kroužky. Tyto nosiče byly známy už od roku 1913, ale právě pan Mahle je upravil pro sériovou výrobu a přizpůsobil pro hliníkový materiál pístů tak, aby nedocházelo k porušení v důsledku využití různých materiálů a jejich různým vlastnostem (především různá teplotní roztažnost). Po různých pokusech byl vybrán materiál NiResist od firmy Internation Nickel Co. [4]

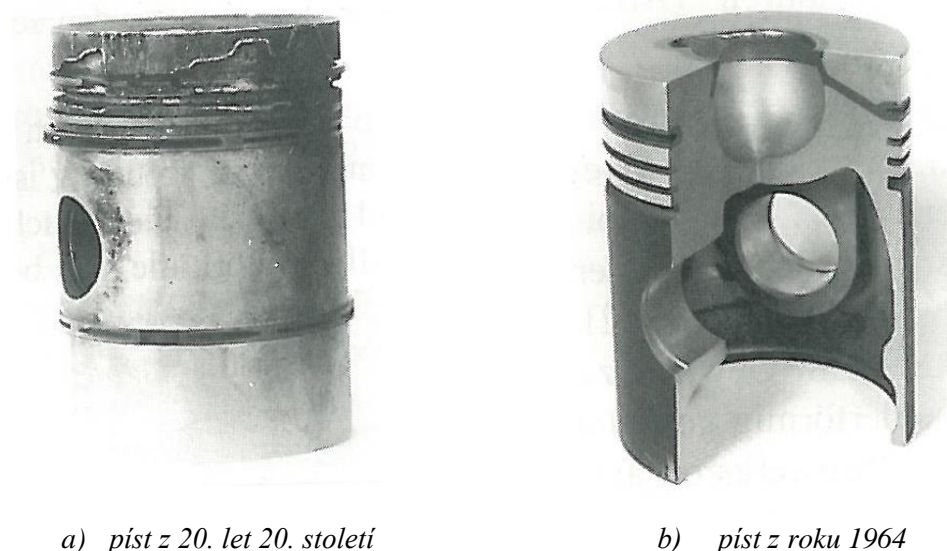


Obrázek 16 – Detail koruny pístu z motoru OM 5 [4]

Tabulka 1 - Složení materiálu NiResist [4]

Legující prvky	Procentuální zastoupení
Ni	15–17,5 %
Cr	1,75–2,5 %
Cu	5,5–7,5 %
Mn	1–1,5 %
Si	1–2,8 %
C	Max. 3 %

Tento materiál měl nejbližší teplotní roztažnost hliníkovému materiálu pístu. Zalití nosiče probíhalo metodou AlFin, díky níž na rozhraní nosič/píst vznikla vrstvička FeAl_3 , která velice dobře propouštěla teplo a zároveň tvořila odolnou vazbu. K otestování takto vylepšených pístů byla využita autobusová doprava po městě Duisburg. Autobus s motorem OB 5 a vylepšenými písty byl nasazen 13. 10. 1931 a do 19. 7. 1932 ujel 87 626 km. S postupem času se z důvodu zvyšování komprese a zlepšení kvality paliva tyto písty vylepšovaly, ale základ již zůstal stejný. Pro porovnání jsou uvedeny obrázky pístu z 20. a 70. let. [4]



a) píst z 20. let 20. století

b) píst z roku 1964

Obrázek 17 – Porovnání pístů dieselových motorů firmy MAHLE [4]

2.3 Konstrukce pístů

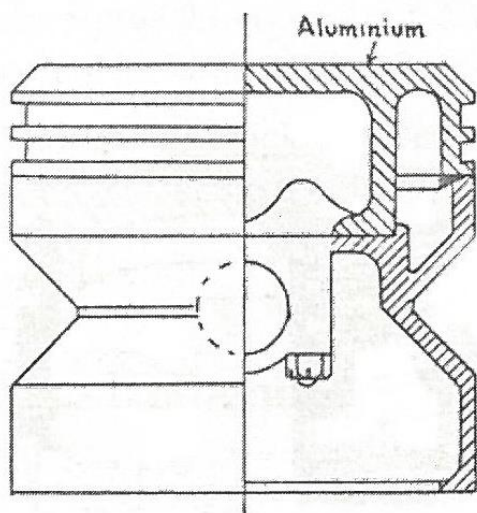
Konstrukční se snažili zkombinovat vlastnosti již používaných litinových pístů s novými možnostmi, které využití nových materiálů přineslo. Nejčastěji byly využívány bimetalické písty. Jak již název napovídá, k jejich konstrukci byly využity dva různé kovy. [4]

Mnoho konstruktérů usilovalo o oddělení pístní koruny a pístního pláště, aby se zamezilo nežádoucímu přesunu tepla na plášť. Jednou z možností bylo vyvinutí rozděleného pístu. Koruna pístu s drážkami pro pístní kroužky byla vyráběna z hliníkových slitin, které jsou charakteristické dobrým vedením tepla (dobré chlazení), zatímco plášť byl vyráběn z litiny. Díky tomu se snížilo opotřebení pístu a zamezilo se zadírání pístu díky nízké teplotní roztažnosti. [3]

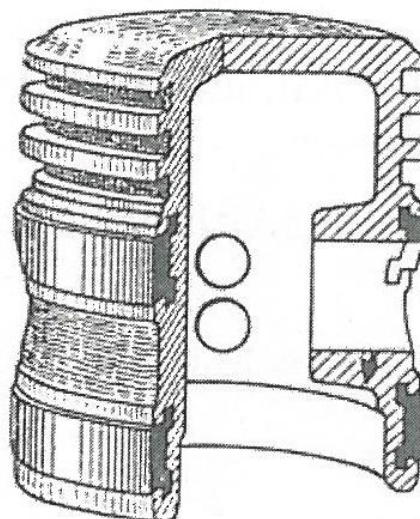
Objevilo se mnoho návrhů, jak spojit oddělené části pístu. Dle způsobu spojení je lze dělit takto:

- pevné,
- kloubové,
- volné. [4]

Jednotlivé typy jsou uvedeny níže (obrázky 18–20). K pevnému spojení se využívaly šrouby nebo spojovací plechy. [4]



a) píst se šroubem



b) píst se spojovacími plechy

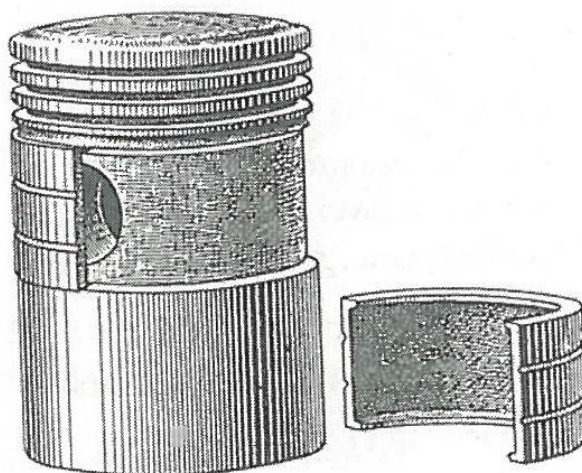
Obrázek 18 – Pevné spojení částí pístu [4]

Kloubové spojení spočívalo v propojení částí pístu ojničným čepem. [4]



Obrázek 19 – Kloubové spojení částí pístu [4]

Volné spojení spočívalo v přidání litinového materiálu v podobě dvou půl prstencových vložek, které zároveň sloužily jako zajištění pístního čepu. [4]

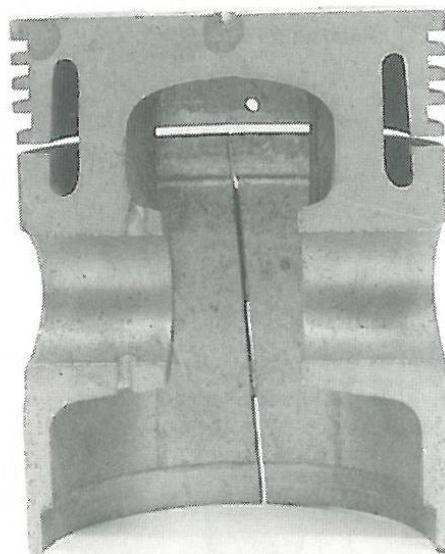


Obrázek 20 – Volné spojení částí pístu [4]

Dalším způsobem, jak se vyrovnat s vysokou roztažností hliníku, bylo zavedení svislé drážky (později v kombinaci s vodorovnou), díky níž se plášť pístu mohl při roztahení zdeformovat. Kombinace svislé a vodorovné drážky se nazývá T drážka. Písty s T drážkou jsou na obrázcích 21 a 22. Bohužel se zjistilo, že tyto písty po ochlazení zůstávají ve zdeformovaném stavu. Spousta konstruktérů se snažila nalézt řešení, jak tomuto trvalému zdeformování zabránit. Tak vznikly písty s rozpínacími kroužky, nebo sponami (vizte Přílohu A, B a C). Tyto písty se pak montovaly do méně zatěžovaných motorů s velkým zdvihovým objemem zejména pro americké automobily (Ford, Chrysler nebo Plymouth). [3,4]



Obrázek 21 – Píst s T drážkou



Obrázek 22 – Píst s T drážkou v řezu [4]

2.3.1 Invarový píst

Hlavní osobou ve vývoji nových pístů byl Američan Adolph Lincoln Nelson, který si ve 20. a 30. letech 20. století nechal patentovat celou řadu pístů. Mezi nimi byly i písty invarové, které se snažily omezit tepelnou roztažnost přidáním výztuhy. Tyto písty měly oddělenou korunu s otvorem pro pístní čep od pláště pístu. Následně tyto dvě části spojil pomocí šikmých, křížem uspořádaných plíšků z invarové oceli (vizte přílohu D). Tato ocelová slitina získala svůj název díky velice malé tepelné roztažnosti (invariable = neměnitelná). Tato metoda se však v praxi neodsvědčila z důvodu vysokého namáhání částí pístu. Z toho důvodu pan Nelson tuto metodu postupně vylepšoval, až našel způsob, jak toto namáhání omezit. Opět spojil dvě rozdělené části pístu plíšky z invarové oceli, které byly tentokrát zality do stěn těchto částí. Tímto se docílilo menší teplotní roztažnosti než u pístů litinových, odolnost proti opotřebení pístu byla ale stále nízká (Příloha E). [3]

První firma vyrábějící tyto písty byla *Bohn Aluminium and Brass Cormoration*. Tento typ pístů se pak využíval až do 90. let 20. století. Jeden z příkladů využití je motor s objemem 1,3 litrů, který se montoval do vozů Škoda Favorit. Tento motor využíval vylepšené invarové písty z 20. let 20. století (vizte obrázek 23).



a) celkový pohled



b) pohled na výztuž

Obrázek 23 – Invarový píst typu autothermic – Škoda Favorit

Další možností, jak zamezit velkému roztažení hliníkového pláště, bylo využití výztuhy z litiny. Jedním z těchto pístů byl píst „autothermic“, který měly ocelové pásy zalité napříč nad náboji pístního čepu. Navíc byly tyto písty ve směru osy pístního čepu zploštělé, díky čemuž se po zahřátí píst roztahoval nerovnoměrně a udržel si správnou vůli v hlavním průměru obou kluzných ploch. Výrobce těchto pístů byla a stále je firma MAHLE, jež se zasloužila i o využívání olejového a vzduchového filtru pro motory. Tyto písty byly lehčí a výroba byla lacinější než v případě pístů invarových, proto se využívaly častěji a setkáváme se s nimi ještě v současnosti, kdy jsou nahrazovány písty „autothermatik“. [3]

2.4 Materiály

2.4.1 Litinové písty

Ačkoli byly obecně litinové písty nahrazovány písty z lehkého kovu, našly své stále uplatnění v motorech s velkým zdvihovým objemem. [4]

2.4.2 Hliníkové písty

Již od počátku bylo jasné, že čistý hliník není vhodný pro výrobu pístů kvůli jeho nízké pevnosti. Proto se do hliníkových slitin přidávaly legující prvky. [4]

V Německu byla vyvinuta slitina Al-Zn-Cu s 8–12% obsahem Zn a 2–5% obsahem Cu. Tyto písty byly vyráběny litím do pískových forem a měly ideální vlastnosti pro tehdejší využití. Problém byl s konstrukcí pístů, které byly založeny na již známých litinových pístech, a proto se musela vyvinout nová konstrukční řešení, která by více vyhovovala novému materiálu. [4]

Američané představili materiál AlCu s obsahem 7–9 % Cu. Tyto písty lépe odolávaly opotřebením, ale byly více křehké. Jejich výroba byla lacinější a jednodušší. Tyto písty se také lily do pískových forem a pro ušetření materiálu se využívala písková nebo železná jádra. Tato slitina byla vyráběna firmou Bonelite, pro kterou vytvořil nové konstrukční návrhy pan Nelson. Tak vznikly invarové písty, které omezovaly vysokou teplotní roztažnost tohoto materiálu. V Německu se výroby této slitiny ujala firma KolbenSchmidt a dostala označení KS-Rot. [4]

Tato slitina byla vylepšena v Anglii přidáním niklu. Vznikla tak slitina AlCu4Ni (Y-Alloy), která však byla z důvodu vysoké teploty tavení náročnější na výrobu. Díky své dobré teplotní odolnosti se nejčastěji využívaly při výrobě letadlových motorů a jejich výrubu prováděla firma Rolls-Royce. [4]

Dalším důležitým legujícím prvkem, kromě mědi (potažmo zinku), se stal křemík. Aby tato slitina měla požadované vlastnosti, musela být tepelně vytvrzena (kalení do vody) a poté popouštěna. Výroba pístů ze slitin AlSi však byla zpočátku velice nákladná, tato slitina byla po tepelné úpravě velice tvrdá a opracování bylo náročné. Postupem času byly určeny vlastnosti ostatních legujících prvků, aby bylo dosaženo co možná nejlepších vlastností pístů. [4]

Legující prvky:

- Si – snížení tepelné roztažnosti a zvýšení odolnosti vůči opotřebením,
- Cu, Mg – zvýšení teplotní roztažnosti a zlepšení teplotní odolnosti,
- Ni, Co – zvyšuje teplotní odolnost a snižuje teplotní roztažnost,
- Cr – stabilizuje strukturu,
- Mn – snižuje teplotní vodivost a kompenzuje škodlivý účinek železa (nečistota).

Jednou z nejrozšířenějších slitin na trhu byla německá slitina KS 280 s obsahem 21 % křemíku, 1,6 % mědi, 1,5 % niklu, 0,6 % hořčíku a manganu a 0,7 % kobaltu. Postupem času se tyto křemíkové slitiny ukázaly jako nejlepší a využívají se tak dodnes. [4]

2.4.3 Elektronové píсты

Jsou to písty vyráběné ze slitin hořčíku. Jejich název je odvozen od způsobu získání hořčíku, tedy elektrolýzy. Hlavní výhodou oproti litinovým pístům byla nízká hustota a dobrá tepelná vodivost. Jako první se využíval materiál CMSi, který měl pouze 1,5 % legujících prvků (z toho 0,8 % Si). Slitina CMSi měla však nízkou odolnost vůči opotřebení. Tuto nevýhodu se podařilo zmírnit příměsí hliníku a křemíku, snížila se tím však tepelná vodivost. Vznikly tak dva materiály, které se lišily obsahem hliníku. (AS 62 a AS 122h) [4]

Tabulka 2 - Složení elektronových pístů AS 62 a AS 122h [4]

Složení hořčíkových materiálů			
	Al [%]	Si [%]	Mg [%]
AS 62	6	2	Zbytek
AS 122h	12	2	Zbytek

Další možností, jak zlepšit odolnost vůči opotřebení, bylo přidáním zinku a křemíku. Vznikl tak materiál ZS 32 s 3% obsahem Zn a 2% obsahem Si. Zbytek materiálu tvořil hořčík. [4]

Tabulka 3 – Porovnání vlastností elektronových pístů [4]

Porovnání hořčíkových slitin s hliníkovou slitinou KS-Rot							
	Hustota [g/cm ³]	Koeficient roztažnosti [K ⁻¹]	Tepelná vodivost [W/cm*K]	Míra opotřebení [-]	Pevnost v tahu [N/mm ²]	Protažení [%]	Pevnost při 300 °C [HB]
KS-Rot	3,1	24	1,42	1,08	150–200	0,3–0,5	34
CMSi	1,7	24–25	1,45	1,68	240	8	4
AS 62	1,8	23–25	0,74–0,84	1,44	180	3	15
AS 122h	1,8	23–26	0,56–0,73	1,4	200	-	21
ZS 32	1,8	24–25	1,344	1,45	200	4	8

Přes všechny snahy se nepodařilo vytvořit materiál, který by mohl konkurovat hliníkovým slitinám. Z důvodu nízké životnosti pístů se tyto materiály používaly jen pro závodní speciály. [4]

2.5 Období 2. světové války

V průběhu 2. světové války došlo k potlačení vývoje motorů, které se musely přizpůsobit využití ve vojenských vozidlech. Důraz byl kladen na rychlou a levnou výrobu. Proto se používaly především již sestavené motory, jen upraveny pro různé potřeby (tankové motory). [7]

Nepochybně velký význam hraje rychlost a akcelerace tanku, ale i akční rádius. Kromě výkonu, spolehlivosti, snadné údržby, malých rozměrů, nízké hmotnosti a životnosti motoru byl kladen také značný důraz na nízkou měrnou spotřebu paliva. [7]

Například německý tank Tiger, který využíval motor od společnosti Maybach, měl hliníkové písty. Motor byl, z důvodu jednotnosti paliva na frontách, zážehový, a proto bylo třeba ke zvýšení výkonu zvýšit otáčky motoru. Z toho důvodu byl píst speciálně odlehčen v podobě vyvrtání děr, což mělo za následek snížení životnosti. Na tuto vlastnost nebyl však v období války kladen tak velký důraz. Odlehčení je názorně vidět na obrázku 24.



a) detail odlehčení pístu



b) celkový pohled na píst

Obrázek 24 – Píst benzínového motoru do tanku Tiger

Nejrozšířenější tank SSSR T-34 využíval vznětový motor V-2. Píst do tohoto motoru již nebyl odlehčován, protože musel vydržet vysokou kompresi. Píst je na obrázku 25.



Obrázek 25 – Píst dieselového motoru do tanku T34

Ve druhé světové válce hrála velkou roli letadla s pístovým motorem. Letadlové motory již od počátku měly vyšší nároky než motory silničních vozidel. Musela být zlepšena provozní spolehlivost a životnost motorů a zároveň se musela co nejvíce zredukovat hmotnost. Proto se využívalo převážně hliníkových pístů, které byly lehčí, ale zároveň vydržely běh motoru při stálém režimu 50 % až 70 % maximálního výkonu. [8]

Využívány byly motory dvojího typu. Prvním typem byl motor řadový, který se tvarem a rozměry nelišil od motorů do silničních vozidel. Jedním z nich byl motor Daimler-Benz DB 601, který se montoval do německého stíhacího letounu Messerschmidt Bf 109. Tento invertní dvanáctiválec měl objem 33,9 litru a hmotnost pouhých 590 kg.



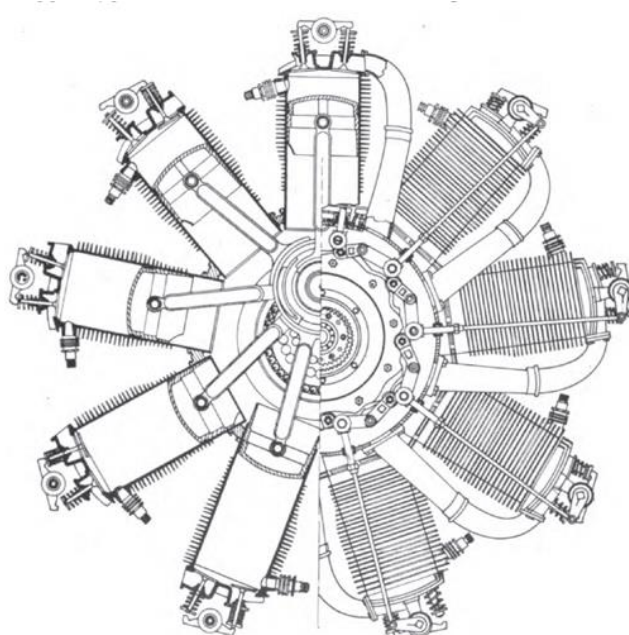
a) celkový pohled



b) detail pístu

Obrázek 26 – Motor Daimler-Benz DB 601

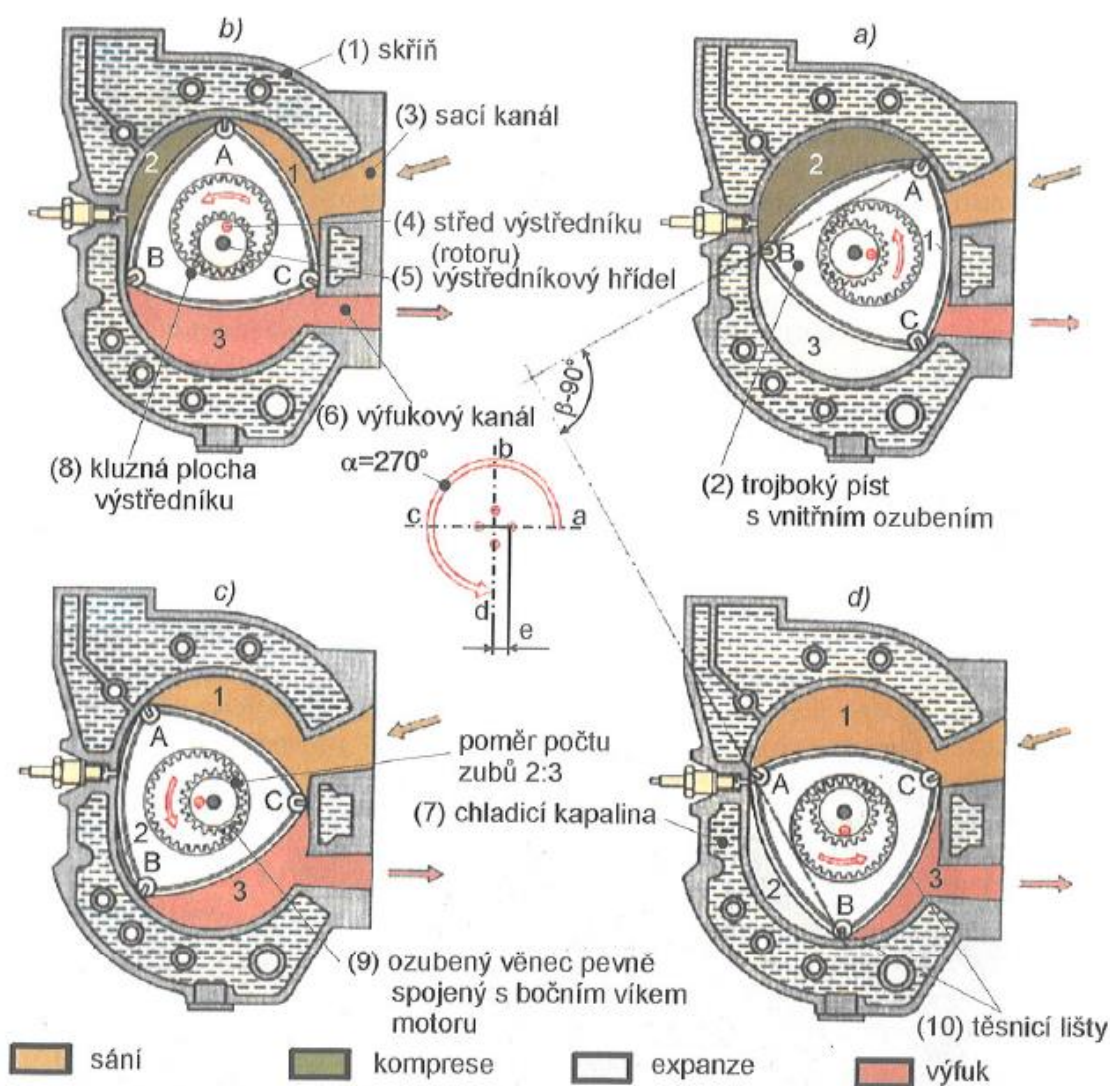
Druhým typem byly motory hvězdicové (vizte obrázek 27), které se lišily provedením klikového hřídele a ojníc.



Obrázek 27 – Náčrt hvězdicového letadlového motoru Le Rhone 9C [9]

2.6 Wankelův motor

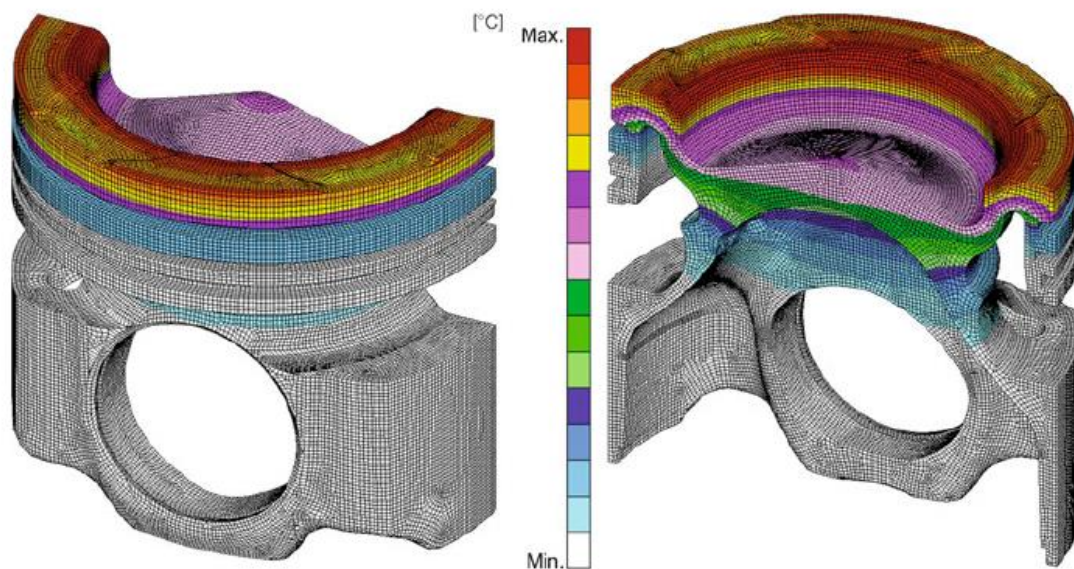
Roku 1954 vynalezl Felix Wankel rotační čtyřdobý motor s trojbokým pístem. Tato speciální konstrukce využívá přenosu rotačního pohybu pístu přímo na vystředěný hřídel. Kapalinou chlazená skříň z hliníkové slitiny má epichotroidní prostor, ve kterém rotuje trojboký píst. Stěny tohoto prostoru jsou pochromovány, aby se snížilo opotřebení. Trojboký píst má na vrcholech lišty, které slouží jako těsnění, z kovokeramického materiálu zvaný Ferrotic. Celý píst je ocelový, aby nedocházelo k velkému zdeformování vlivem teploty, a jeho hmotnost může být vyšší, jelikož nemusí být při každé úvratí brzděn a rozpohybován. Díky tomu má Wankelův motor hladší chod než tradiční pístové motory a běžně využívá vyšších otáček. Wankelův Motor má však nižší termodynamickou účinnost a nedosahuje takové životnosti jako běžné pístové motory. Pro lepší pochopení pracovního cyklu Wankelova motoru je níže uvedeno schéma. Ačkoli se Wankelův motor poprvé objevil u automobilů německé značky NSU (konkrétně NSU Spider), dnes jej hojně využívá známá automobilka Mazda, která jej montovala například do úspěšného modelu RX-8. [1,13]



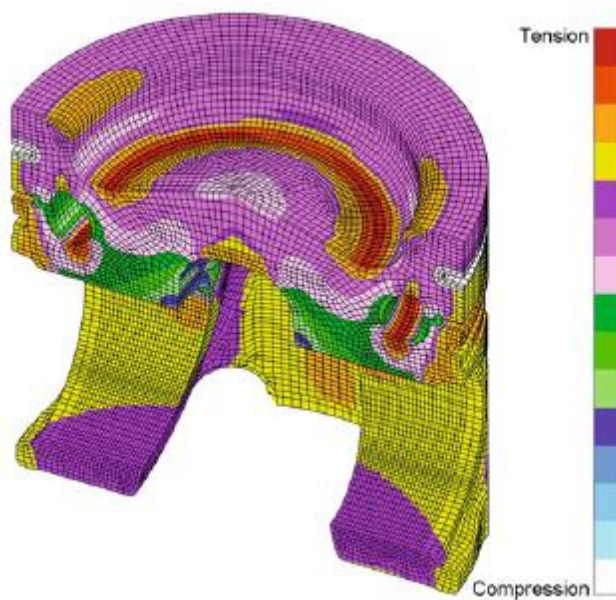
Obrázek 28 – Schéma funkce wankelova motoru [1]

3 Dnešní písty

V dnešní době existují různé typy motorů, z nichž každý vyžaduje vlastní variantu pístu. Tyto varianty se od sebe vzájemně liší vlastní konstrukcí, tvarem, materiálem a rozměry. Konstrukteři jsou za použití počítačových simulací a různých způsobů analýzy schopni vyřešit až 90 % problémů před tím, než vůbec vyrobí prototyp. Obrázky níže ukazují příklady počítačové simulace.



Obrázek 27 – Počítačová simulace teplotního zatížení pístní koruny [2]



Obrázek 28 – Počítačová simulace napětí pro píst se solným jádrem [2]

3.1 Typy pístů

3.1.1 Písty pro čtyřdobé benzínové motory

Tyto písty jsou charakteristické nízkou hmotností a občasným výskytem pláště s rozdílnou tloušťkou stěny na straně zatížené a na straně odlehčené od ojnice. Tyto písty se také vyznačují zvláště vysokou pružností střední a spodní části pláště. [2]

Existují písty, které redukuje rozdíl teplot mezi vlastním hliníkovým pístem a blokem motoru ze šedé litiny – tyto materiály mají různé teplotní roztažnosti. Teplotní roztažnost je redukována proužky z niklové oceli, zalitými mezi plášť pístu a otvor pro pístní čep, proto můžeme tyto písty označovat jako bimetalické. Tuto metodu redukce využívají písty s označením „autothermic“ a „autothermatik“. [2]

Autothermic (obrázek 29) jsou písty, které kromě uložení pod ojnicí čep mají mezi pláštěm pístu a pístním dnem olejovou drážku procházející celým materiálem. Díky této drážce a ocelovým páskům se redukuje teplotní roztažnost v kritickém směru pro vedení pístu ve válci. Kvůli jejich nízké únosnosti jsou již tyto písty neaktuální a jsou postupně nahrazovány písty s lepšími vlastnostmi. Tyto písty se vyznačují velice tichým chodem. [2]



Obrázek 29 - Píst Autothermic s vyznačenou drážkou. [2]



Obrázek 30 - Píst Autothermatik s vyznačenou drážkou. [2]

Autothermatik (obrázek 30) jsou písty, které nahrazují písty autothermic. Mají stejnou strukturu jako autothermic písty, ale mezi pláštěm pístu a pístním dnem mají olejovou drážku, která neodděluje tyto dvě hlavní části pístu. Tato drážka tolik teplotně neizoluje plášť pístu od pístní koruny, jako je tomu u pístu autothermic, ale díky ní má píst lepší pevnostní vlastnosti. Tyto písty se dodnes používají pro benzínové a naftové nepřepřehované motory. [2]

V osobních automobilech s benzínovým motorem se využívají BOX-TYPE písty, které charakterizuje nízká hmotnost, maximálně využitá výztuha a zploštění pláště pístu na stranách odlehčené ojnici. Díky tvaru pláště pístu je velký rozdíl teplot mezi hliníkovým pístem a blokem motoru z šedé litiny vykompenzován velmi dobrými elastickými vlastnostmi. Zploštění pláště je naznačeno na obrázku 32. Tyto písty se montují do bloků motoru z hliníku i šedé litiny a jsou vyráběny odléváním nebo kovááním. Kované písty jsou ideální pro vysokorychlostní motory a motory přepřehované. Avšak kováání pístů je velice nákladné, jak z důvodu samotného kováání, tak i z důvodu následného obrobení. Pro zvýšení odolnosti odlévaných pístů se využívá zalití litinového nosiče prvního pístního kroužku, protože je tento pístní kroužek nejvíce namáhán. [2]



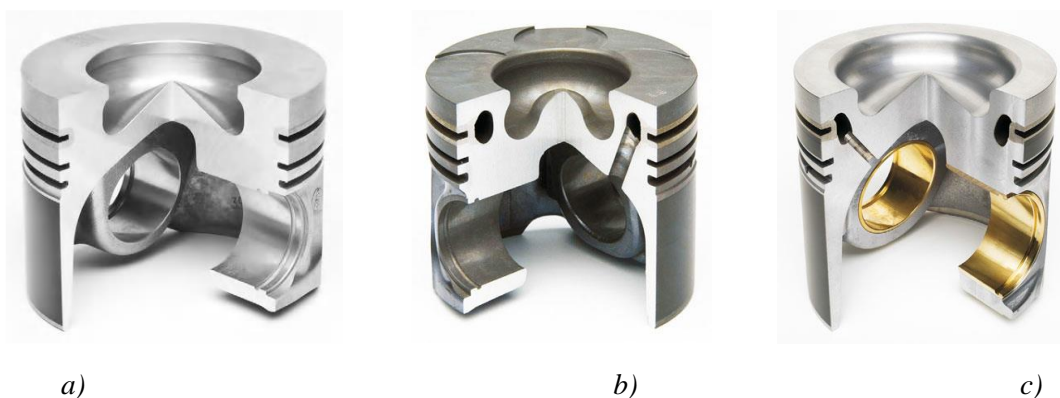
Obrázek 31 - Píst BOX-TYPE. [2]



Obrázek 32 - Zploštění pláště pístu BOX-TYPE. [2]

3.1.2 Písty pro čtyřdobé naftové motory

Písty pro naftové motory se od benzínových pístů nejvíce liší vlastním materiálem, tvarem a velikostí spalovacího prostoru, jelikož naftové motory fungují na jiném principu a výhřevné vlastnosti paliva jsou také značně odlišné. Navíc jsou tyto písty specifické tím, že druhý pístní kroužek je pevně přivařen k drážce pro tento kroužek. Drážka pro první pístní kroužek je dělana z austenitické litiny, která má stejný koeficient roztažnosti jako litina pro celý píst. Tento materiál je odolný vůči tření a opotřebení, což je pro kritický první pístní kroužek velice důležité, protože v naftových motorech jsou vysoké tlaky a teploty. Tato metoda výroby pístů se využívá již od 30. let 19. století. [2]



Obrázek 33 – Srovnání pístů pro naftové motory: a) bez kanálku, b) s kanálkem, c) chlazení pístního čepu. [2]

Písty v naftových motorech je třeba speciálně chladit. Proto se využívají chladicí kanálky, ve kterých cirkuluje olej. Cirkulace je zajištěna pohybem klikové hřídele. Tyto kanálky mají za úkol chladit spalovací prostor, pístní kroužky a pouzdro pro pístní čep, což jsou nejvíce teplotně namáhané části pístu. Pro srovnání je uveden obrázek 33. [2]

Kvůli dnešnímu trendu úspory paliva a lepším emisím se konstruktéři snaží snížit hmotnost. Proto se pro naftové motory využívají kované písty. Výsledkem je to, že se může zvýšit kompresní poměr a tím se i celý píst může zmenšit, což vede k zmenšení celého motoru a úspoře až desítek kilogramů celkové hmotnosti. Využití ocelových pístů pro snížení hmotnosti je v dnešní době možné díky vyspělé technologii kování.

Pro vysoce namáhané písty se používá metoda svařování elektronovým paprskem. Základem je dno a plášť pístu z kovaného hliníku, díky čemuž má píst lepší pevnostní vlastnosti a je lehčí. Část s nosiči pístních kroužků je tvořena odléváním, což umožňuje přidání solných

jader a zalití nosiče prvního pístního kroužku z austenitické litiny. Solná jádra se využívají k výrobě chladících kanálků. Pro názornost je uveden obrázek 34. [2]

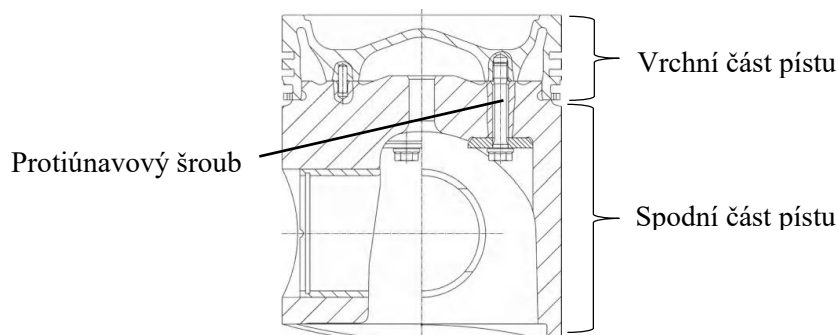


Obrázek 34 - Píst vyráběný metodou elektronového svařování. [2]

3.1.3 Písty složené

Složené písty umožňují lepší začlenění chladících kanálků a využití vlastností různých materiálů. Tyto písty nacházejí uplatnění ve vysoce výkonných motorech (500–30 000 kW), které mají až 20 válců. Nejčastěji jsou to motory generátorů, lodních motorů, těžké stavební stroje a lokomotivy. Tyto písty se z pravidla dělí na dvě části (vizte obrázek 35) [2]

- vrchní část pístu – pístní dno + drážky pro pístní kroužky,
- spodní část pístu – plášť pístu + oko pro pístní čep,

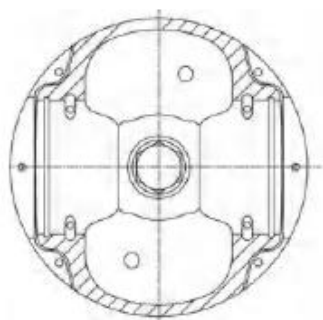


Obrázek 35 - Složený píst s popiskem. [2]

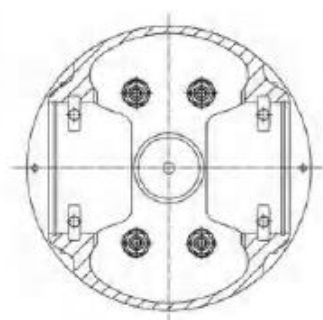
spojené šrouby se zvýšenou odolností vůči únavě. Spojení se dělí, podle chladících kanálků, tvaru a velikosti pístu takto:

- centrální (tzv. jedno-šroubové),
- čtyř-šroubové. [2]

Nákresy pístů centrálního a čtyřšroubového jsou uvedeny na obrázcích 36 a 37.



Obrázek 36 - Centrální spojení. [2]



Obrázek 37 - Čtyř-šroubové spojení. [2]

Vrchní část složeného pístu je dělána z kované oceli z důvodu pevnosti a je opatřena chladicími kanálky. Při používání těžkého paliva (např. mazut) se musí drážky pro pístní kroužky indukčně vykalit nebo pochromovat, aby se zvýšila odolnost vůči opotřebení. [2]

Spodní část složeného pístu je vyráběna třemi způsoby.:

- Kovaný hliník se využívá pro nízko a středně zatěžované písty, mají nízkou hmotnost a jsou dobře smontovatelné.
- Tvárná litina se využívá pro písty se zatížením nad 20 MPa, vyznačují se nízkou teplotní roztažností, díky čemuž může být vymezena menší vůle mezi pístem a válcem.
- Kovaná ocel se využívá pro silně zatížené písty se zatížením nad 24 MPa, mají vysokou pevnost a materiál má velice málo vad (příměsí, bodové poruchy). [2]

3.2 Materiály pístů

3.2.1 Hliníkové písty

Nejčastějším materiálem pro výrobu pístů je díky své nízké hmotnosti a dobré tepelné vodivosti hliník. Čistý hliník má ale nízkou pevnost a špatnou odolnost vůči opotřebení. Díky disperznímu vytvrzování a přidáváním legujících prvků (především křemíku, mědi, hořčíku a niklu) získává hliník lepší mechanické vlastnosti. V dnešní době se nejčastěji využívá slitina M124, mezi další často využívané slitiny hliníku patří například slitina M126, která se využívá především k výrobě pístů osobních automobilů v USA, a slitiny M138 a M244 se využívají pro písty dvoudobých motorů. Pro přehledné shrnutí vlastností a ložení jsou uvedeny tabulky 4 až 6. [2]

Tabulka 4 - Srovnání materiálů pro hliníkové písty. [2]

	M124 AlSi12CuMgNi	M126 AlSi16CuMgNi	M138 AlSi18CuMgNi	M244 AlSi25CuMgNi
Si [%]	11–13	14,8–18	17–19	23–26
Cu [%]	0,8–1,5	0,8–1,5	0,8–1,5	0,8–1,5
Mg [%]	0,8–1,3	0,8–1,3	0,8–1,3	0,8–1,3
Ni [%]	0,8–1,3	0,8–1,3	0,8–1,3	0,8–1,3
Fe [%]	max. 0,7	max. 0,7	max. 0,7	max. 0,7
Mn [%]	max. 0,3	max. 0,3	max. 0,3	max. 0,3
Ti [%]	max. 0,2	max. 0,2	max. 0,2	max. 0,2
Zn [%]	max. 0,3	max. 0,3	max. 0,3	max. 0,2
Cr [%]	max. 0,05	max. 0,05	max. 0,05	max. 0,6

Nejdůležitější legurou je křemík. Jedna z firem, ve kterých se hojně využívá křemík jako legující prvek, je Silv-O-Lite, kde k výrobě pístů užívají slitiny hliníku s obsahem 15–16 % křemíku, přičemž obsah rozpuštěného křemíku je 12 % a 4 % se vyloučí jako krystaly. [10]

Tabulka 5 - Vlastnosti materiálů pro hliníkové písty. [2]

Veličina	Teplota	M124	M126, M138	M142, M145, M174+	M244
Tvrdost [HB10]	20 °C	90–130	90–130	100–140	90–130
Mez pevnosti s vtahu [MPa]	20 °C	200–250	190–220	200–280	170–210
	150 °C	180–200	170–200	180–240	160–180
	250 °C	90–110	80–110	100–120	70–100
	350 °C	35–55	35–55	45–65	35–55
Mez pružnosti [MPa]	20 °C	100–230	170–200	100–260	170–200
	150 °C	170–210	150–180	170–220	130–180
	250 °C	70–100	70–100	80–110	70–100
	350 °C	20–30	20–40	35–60	30–50
Relativní prodloužení [%]	20 °C	<1	1	<1	0,1
	150 °C	1	1	<1	0,4
	250 °C	3	1,5	1,5–2	0,5
	350 °C	10	5	7–9	2
Mez únavy [MPa]	20 °C	90–110	80–10	100–110	70–90
	150 °C	75–85	60–75	80–90	55–70
	250 °C	45–50	40–50	50–55	40–50
	350 °C	20–25	15–25	35–40	15–25
Modul pružnosti v tahu [MPa]	20 °C	80 000	84 000	84 000–85 000	90 000
	150 °C	77 000	80 000	79 000–80 000	85 000
	250 °C	72 000	75 000	75 000–76 000	81 000
	350 °C	65 000	71 000	70 000–71 000	76 000
Tepelná vodivost [W/m*K]	20 °C	145	140	130–135	135
	350 °C	155	150	140–145	145
Teplotní roztažnost [10^{-6} m/m*K]	20–100 °C	19,6	18,6	18,5–19,5	18,3
	20–200 °C	20,6	19,5	19,5–20,5	19,3
	20–300 °C	21,4	20,2	20,5–21,2	20
	20–400 °C	22,1	20,8	21–21,8	20,7
Hustota [g/cm³]	20 °C	2,68	2,67	2,75–2,79	2,65
Relativní míra opotřebení		1	0,8	0,85–0,9	0,6

Tabulka 6 - Vlastnosti materiálů pro hliníkové písty s přidáním křemíkem. [2]

Veličina	Teplota	M124P	M142P	M-SP25
Tvrdość [HB10]	20 °C	100–125	100–140	120–150
Mez pevnosti s vtaħu [MPa]	20 °C	300–370	300–370	350–450
	150 °C	250–300	270–310	350–400
	250 °C	80–140	100–140	130–240
	350 °C	50–100	60–100	75–150
Mez pružnosti [MPa]	20 °C	280–340	280–340	320–400
	150 °C	220–280	230–280	280–340
	250 °C	60–120	70–120	90–230
	350 °C	30–70	45–70	50–90
Relativní prodloužení [%]	20 °C	<1	1	8
	150 °C	4	2	9
	250 °C	20	6	12
	350 °C	30	20	12
Mez únavy [MPa]	20 °C	110–140	110–140	120–150
	150 °C	90–120	100–125	110–135
	250 °C	45–55	50–60	55–75
	350 °C	30–40	40–50	40–60
Modul pružnosti v tahu [MPa]	20 °C	80 000	84 000	73 500
	150 °C	77 000	79 000	68 500
	250 °C	72 000	75 000	64 000
	350 °C	69 000	73 000	62 000
Tepelná vodivost [W/m*K]	20 °C	155	140	140
	300 °C	165	150	170
Teplotní roztažnost [10^{-6} m/m*K]	20–100 °C	19,6	19,2	22,4
	20–200 °C	20,6	20,5	24
	20–300 °C	21,4	21,1	24,9
Hustota [g/cm³]	20 °C	2,68	2,77	2,77
Relativní míra opotřebení		1	0,9	1,3

3.2.2 Železné materiály

Železných materiálů se využívá v případě, že by hliníkové písty zatížení nevydržely. Pro zvýšení pevnostních charakteristik hliníkových pístů se občas využívá přídavku ocelových částí, například prstencových výztuží, v případě, že takové zpevnění nestačí, jsou použity celé ocelové komponenty, jako jsou ocelové šrouby či pístní dno. Do materiálů sloužících k výrobě pístů se přidává křemík, jenž podporuje vylučování volného uhlíku z oceli ve formě grafitu. [2]

Litiny

Litiny mají více jak 2,14 % uhlíku a perlitickou strukturu s lamelárním nebo kuličkovým grafitem. Tyto litiny jsou speciálně upravovány, aby se docílilo zlepšení jejich slévarenských vlastností. Protože litiny mají poměrně veliký součinitel teplotní roztažnosti, je třeba využít pístních kroužků z austenitické oceli s lupínkovým, či kuličkovým grafitem. Pro výrobu pístů Dieselových motorů, u kterých dochází k vysokému tepelnému a mechanickému namáhání se využívá perlitická tvárná litina EN GJS 700-2. Tento materiál se využívá jak na jednoduché písty, tak na pístní pláště u pístů složených. [2]

Tabulka 7 - Srovnání vlastností litin. [2]

Veličina	Austenitická ocel pro pístní kroužky		Litina s kuličkovým grafitem pro písty
	M-H (lupínkový)	M-K (kuličkový)	M-S70 (EN GJS 700-2)
Legující prvek [hm. %]	C	2,4–2,8	2,4–2,8
	Si	1,8–2,4	2,9–3,1
	Mn	1–1,4	0,6–0,8
	Ni	13,5–17	19,5–20,5
	Cr	1–1,6	0,9–1,1
	Cu	5–7	<0,1
	Mo		
	Mg	0,03–0,05	0,04–0,06
Tvrdość [HB]	120–150	140–180	240–300
Mez pevnosti [MPa]	20 °C	190	380
	100 °C	170	640
	200 °C	160	600
	300 °C	160	590
	400 °C	150	530
Smluvní mez pružnosti [MPa]	20 °C	150	210
	100 °C	150	390
	200 °C	140	360
	300 °C	140	350
	400 °C	130	340
Relativní prodloužení [%]	20 °C	2	8
Mez únavy [MPa]	20 °C	150	250
Modul pružnosti v tahu [MPa]	20 °C	100 000	120 000
	200 °C		171 000
Tepelná vodivost [W/m*K]	20 °C	32	13
Tepelná roztažnost [10 ⁻⁶ m/m*K]	20–200 °C	18	18
Hustota [g/cm ³]	20 °C	7,45	7,4

Oceli

Železné materiály sloužící k výrobě celých pístů mají maximální obsah uhlíku 2,14 %. Tyto materiály – oceli – jsou ideální pro kování. Zatímco materiály pro výrobu komponentů – podeutektoidní oceli – obsahují maximálně 0,765 % uhlíku, podeutektoidní oceli mají ferriticko-perlitickou strukturu, jež má nedostatečnou pevnostní charakteristiku. U těchto materiálů se ke zvýšení pevnostních vlastností využívá kování (nad 850 °C) nebo přidávání legujících prvků. Při kalení dochází ke snížení pevnostních vlastností kvůli pomalému ochlazování vnitřního materiálu pístu, proto se přidávají prvky snižující kritickou rychlost ochlazování, jako například mangan, chrom, nikl a molybden. Pro zvlášť namáhané písty

a pístní komponenty se používá tepelně ošetřená chrom-molybdenová ocel 42CrMo4. Nejenže dojde ke zlepšení vytvrditelnosti oceli, ale oba prvky podporují vylučování karbidů. Molybden navíc zvyšuje pevnost za zvýšených teplot. I v případě této oceli se však musí u pístů s velkým vnitřním průřezem při tepelném ošetření počítat se snížením pevnostní charakteristiky ve směru k jádru. Jako další možnost se využívá precipitační vytvrzování ocelí, typickou AFP (precipitačně vytvrzenou ferriticko-perlitickou) ocelí je např. 38MnVS6, která se využívá především pro komerční vozidla a kované ocelové pláště uložených pístů. Hlavními výhodami využití AFP ocelí je zvýšení výsledných mechanických vlastností, aniž by bylo nutné následné nákladné tepelné ošetření. [2]

Tabulka 8 - Srovnání vlastností ocelí. [2]

Veličina		42CrMo4	38MnVS6
Druh tepelného zpracování		Tepelně ošetřené	Řízené ochlazování z tepelného zpracování
Legující prvek [hm. %]	C	0,38–0,45	0,34–0,41
	Si	Max. 0,4	0,15–0,8
	Mn	0,6–0,9	1,2–1,6
	Cr	0,9–1,2	Max. 0,3
	Mo	0,15–0,3	Max. 0,08
	P	Max. 0,035	Max. 0,025
	S	Max. 0,035	0,02–0,06
	V		0,02–0,08
	N		0,01–0,02
Tvrdost [HB]		265–300	240–310
Mez pevnosti [MPa]	20 °C	920–980	910
	130 °C	870–960	860
	300 °C	850–930	840
	450 °C	630–690	610
Smluvní mez pružnosti [MPa]	20 °C	740–860	610
	130 °C	700–800	570
	300 °C	680–750	540
	450 °C	520–580	450
Relativní prodloužení [%]	20 °C	12–15	14
	130 °C	8–13	9
	300 °C	10–13	11
	450 °C	15–16	15
Mez únavy [MPa]	20 °C	370–440	370
	130 °C	350–410	350
	300 °C	340–400	320
	450 °C	280–340	290
Modul pružnosti v tahu [MPa]	20 °C	212 000	208 000
	130 °C	203 000	201 000
	300 °C	193 000	189 000
	450 °C	180 000	176 000
Tepelná vodivost [W/m*K]	20 °C	44	38
	130 °C	43	39
	300 °C	40	39
	450 °C	37	37
Teplotní roztažnost [10^{-6} m/m*K]	20–300 °C	13,2	13,1
	20–450 °C	13,7	13,7
Hustota [g/cm ³]	20 °C	7,8	7,78

3.3 Povlakování

Pláště pístu se povlakují, aby se zamezilo lokálnímu svařování mezi pístem a válcem a zadření pístu, nikoli z důvodu zvýšení odolnosti vůči opotřebení. Za normálních podmínek, je-li správně navržen, plášť pístu nevyžaduje povlakování. Nebezpečí zadření existuje pouze za extrémních provozních podmínek, jako například:

- při lokálním nedostatku vůle způsobeném mechanickou nebo tepelnou deformací válce,
- při nedostatečném mazání, jako například při tzv. studeném startu,
- při použití oleje s nevyhovujícími vlastnostmi, zapříčiněnými nečistotami v palivu, extrémně vysokými provozními teplotami nebo stárnutím oleje,
- u nezaběhnutého motoru [2]

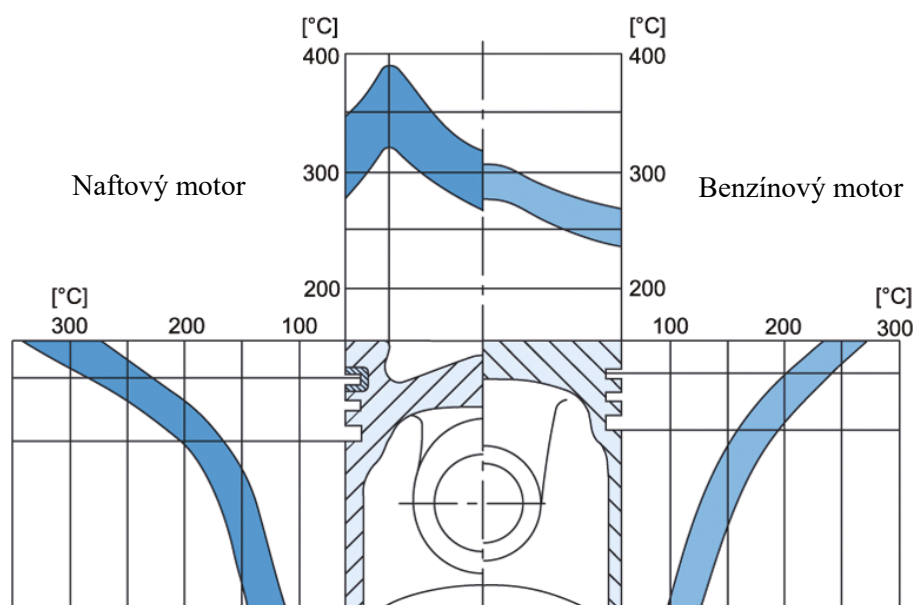
Firma KolbenSchmidt využívá materiály s označením *LofriKS®* (zkratka Low Friction) nebo *NofriKS®*. Tento materiál má vysoký obsah uhlíku a nanočástice titanoxidu, což zvyšuje odolnost proti opotřebení. Nanáší se sítotiskem ve vrstvě silné 10 až 12 μm . Při výběru druhu povlakování se klade důraz na kompatibilitu materiálu s použitým mazivem, jež musí vyhovovat materiálu vložky válce, která většinou bývá vyrobena z hliníku nebo litiny. [11]

3.4 Chlazení pístů

Nejčastěji se musí chladit písty v přepřlňovaných motorech a vysoce zatížených nepřepřlňovaných motorech. Konkrétně se musí chladit první drážka pro pístní kroužek. Pokud by teplota této drážky překročila 240 °C, mohlo by se začít zapékat chladicí médium, nejčastěji olej. Při zapékání oleje může dojít k zadření pístu ve válci a zničení celého motoru. Takto zapečený píst je na obrázku 38. U tohoto konkrétního případu došlo k zapečení z důvodu použití nevhodného oleje. [2]



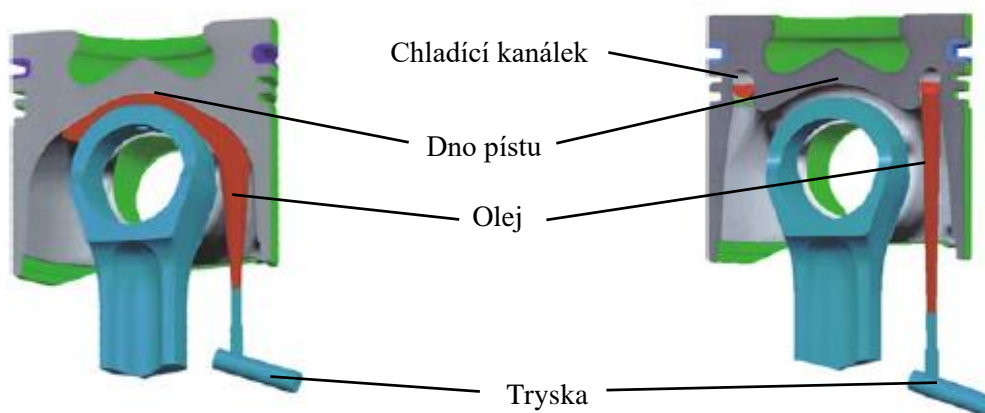
Obrázek 38 – Zapečený dieselový píst z motoru 2,3l MultiJet II – Fiat Ducato 150



Obrázek 39 - Průběh teploty na hliníkovém pístu. [2]

Chlazení pístů se provádí dvěma způsoby:

- nástrík dna pístu – využívá se u méně zatěžovaných motorů,
- chladicí kanálky – nejefektivnější způsob chlazení, který se využívá u motorů přeplňovaných. Jsou vyráběny za pomoci soli, která je po ztuhnutí materiálu odstraněna za pomoci vody pod velkým tlakem.



Obrázek 40 - Chlazení nástríkem dna pístu. [2]

Obrázek 41 - Chlazení pomocí kanálku. [2]

Jako chladicí médium se využívá olej, který je vháněn do trysek pohybem klikové hřídele. Trysky jej poté vypouští na pístní dno, nebo přímo do chladicích kanálků. Tyto způsoby jsou na obrázcích 40 a 41. [12]

Tabulka 9 - Odvod tepla z pístu. [12]

	Nechlazený píst	Nástrík dna pístu	Chladicí kanálek
Olej		45 %	68 %
Pístní kroužky	62 %	41 %	18 %
Vzduch a olej v klikové skříni	24 %	8 %	8 %
Plášť pístu	14 %	6 %	6 %

3.5 Píst pro 1,5l TSI EVO - VW EA211

Jedná se o píst z hliníkové slitiny, který vyrábí firma KS – Rheinmetall. Tento píst se vyrábí od konce roku 2017 v Brazílii a od začátku dubna 2018 i v ČR. Předpokládaná výrobní kapacita je 5 000 000 kusů ročně. Tvar pístu vychází z designu LiteKS-2.

Plášť pístu je na zatížených stranách povlakován materiálem *LofriKS®* a zploštělý po stranách, kde se nacházejí oka pro pístní čep. Píst má zalitý nosič prvního pístního kroužku z litiny. Pístní čep je povrstvený metodou DLC (Diamond Like Carbon), což dodává čepu vysokou tvrdost, vysokou odolnost vůči opotřebení a díky uhlíku je sníženo i tření. První pístní kroužek je povlakován metodou PVD (Physical Vapour Deposition). Tato metoda se využívá i pro povlakování obráběcích nástrojů. Tímto se zlepšují důležité vlastnosti pro pístní kroužek. Snižuje se tření, zvyšuje se tvrdost, odolnost vůči otěru a vysoké teplotě.

Je vyvinuta varianta i pro CNG aplikaci (TGI). Píst pro CNG má navíc vytvrzenou drážku pro druhý pístní kroužek. Toto vytvrzování probíhá anodací.



Obrázek 42 – Píst designu LiteKS-2 do motoru 1,5l TSI

Tento motor (viz obrázek 43) se v současnosti montuje například do vozu VW Golf, Škoda Karoq a v budoucnu jej bude možno najít i v automobilech Škoda Octavia nebo Seat Ibiza a Arona. Jedná se o vrcholnou verzi z rodiny motorů EA211 a postupně bude nahrazovat motory 1,4 TSI a 1,8 TSI. Tento čtyřválcový motor má výkon 96/110 kW a maximální krouticí moment je 200/250 Nm. [14]



Obrázek 43 – Motor 1,5l TSI Evo [14]

Závěr

Tato práce byla zaměřena na rešerši historického vývoje pístů čtyřdobých spalovacích motorů a jejich aplikace.

V úvodu bylo vysvětleno, jak funguje čtyřdobý spalovací motor a detailně popsány funkce a vlastnosti pístu. K popisu zatížení pístu při procesu spalování bylo využito grafické i slovní zhodnocení.

V historické části je popsána souvislost mezi písty parního stroje a spalovacího motoru. Poté je shrnuto období největšího rozvoje spalovacích motorů a to zejména v automobilovém průmyslu. Jsou zde zmíněny konkrétní příklady vyvíjených motorů a problémů, které museli konstruktéři řešit. Dále se v této kapitole rozebírají různá konstrukční řešení pístů a využívané materiály nejznámějších firem. Závěrem historie je zmíněna druhá světová válka a vliv upřednostňovaných vlastností v tomto období.

Kapitola dnešních pístů se zabývá popisem pístů pro benzinové i dieselové motory, jsou rovněž uvedeny různé konstrukční způsoby provedení. Zmíněny jsou i materiály, které se v dnešní době používají, a jejich vlastnosti, výhody a nevýhody. Následuje zmínka o povlakování, díky kterému se vykompenzují určité nedostatky různých materiálů, a je popsán způsob chlazení pístů. Závěrem této kapitoly je pro ilustraci popsán píst motoru VW 1,5 TSI Evo, na němž je znázorněna kombinace různých konstrukčních prvků, aby bylo dosaženo ideálních vlastností pro provoz.

Tato práce obsahuje shrnutí různých podob pístů pro čtyřdobé spalovací motory, se kterými se můžeme setkat. Z důvodu rozsáhlosti tohoto tématu jsou uvedeny především varianty pro silniční motorová vozidla využívaná v každodenním provozu.

Použité zdroje

- [1] JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily*. 2., aktualiz. vyd. Brno: Avid, 2008. ISBN 978-80-87143-06-3.
- [2] MAHLE GMBH (ED.). *Pistons and engine testing*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012. ISBN 9783834886620
- [3] HEINZE, Edwin P.A. a A. KYZLINK. *Tvůj přítel motor*. Praha: Č.A.T., 1942.
- [4] STEFAN ZIMA. BEARB. VON HELMUT TSCHÖKE. *Motorkolben: Bauarten, Betrieb, Schäden ; mit 210 Tabellen*. Wiesbaden: Vieweg, 2005. ISBN 9783528039868.
- [5] *Entwicklung von Fahrzeugmotoren ab 1918* [online]. , 19 [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: www.kvm.tul.cz/getFile/id:2035
- [6] *1923: Go-ahead for the OB 2 prechamber diesel* [online]. [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: <http://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/1923-Go-ahead-for-the-OB-2-prechamber-diesel.xhtml?oid=9913723>
- [7] *Tankové motory* [online]. [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: <https://www.valka.cz/589-Tankove-motory>
- [8] ADAMEC, Josef a Jindřich KOCÁB. *Letadlové motory*. Vyd. 2. Praha: Corona, 2008. ISBN 978-80-86116-54-9.
- [9] Nieuport 11-3D model project. In: Theaerodrome.com [online]. 2012 [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <http://www.theaerodrome.com/forum/art/56009-nieuport-11-3d-model-project.html>
- [10] *Silvolite Catalog* [online]. [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: https://www.uempistons.com/catalogs/silvolite_catalog.pdf
- [11] *Kolbenschmidt Zaoštroeno na produkty* [online]. [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: https://www.ms-motorservice.com/fileadmin/media/MAM/PDF_Assets/KOLBENSCHMIDT-Zaostreno-na-produkty_55609.pdf
- [12] RAUSCHNER, Jaroslav. *Vozidlové motory*. Brno. Studijní opory. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] *Wankelův rotační motor: Nepoháněl pouze Mazdy. Kde všude se objevil?* [online]. 2017 [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/wankeluv-rotacni-motor-nepohanel-pouze-mazdy-kde-vsude-se-objevil-110591>
- [14] VW odhalil kouzla zvětšeného motoru 1.5 TSI. Uspoří až litr paliva. *Auto.idnes.cz* [online]. 2016 [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: VW odhalil kouzla zvětšeného motoru 1.5 TSI. Uspoří až litr paliva Zdroj: https://auto.idnes.cz/motor-volkswagen-ea211-tsi-evo-dji-/automoto.aspx?c=A160505_194229_automoto_vok
- [15] *Google patents* [online]. 2017 [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <https://patents.google.com/?q=piston&inventor=Adolph+L+Nelson>

Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Jednotky	Legenda
F_K	[N]	Tlaková síla expanze
F_{ST}	[N]	Složka síly F_K ve směru ojničního čepu
F_s	[N]	Složka síly F_K ve směru stěny válce
MWM	[-]	Motoren Werke Mannheim
MAN	[-]	Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg
Co.	[-]	Corporation = korporace
TSI	[-]	Twincharged Stratified Injection
TGI	[-]	Turbo Gas Injection

Seznam příloh

Příloha A – Píst s rozpínacím kroužkem

Příloha B – Píst s rozpínací sponou

Příloha C – Píst se zarážkou

Příloha D – První invarový píst

Příloha E – Zdokonalený invarový píst

Přílohy

Příloha A

Dec. 11, 1934.

H. O. MILLS

1,984,195

PISTON SKIRT EXPANDER

Filed Nov. 3, 1932

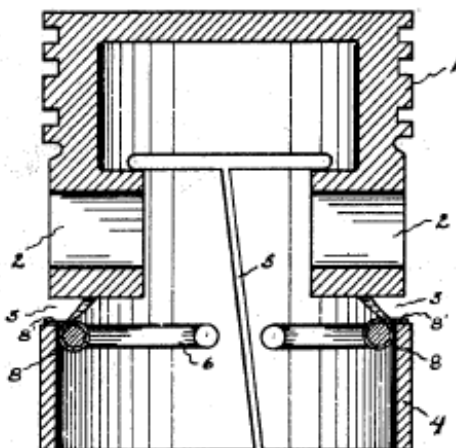


Fig. 1

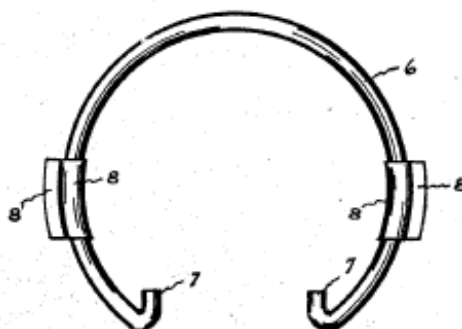


Fig. 2

Inventor
Harold O. Mills
by *Frederick S. Beaman*
Attorney

Příloha B

April 12, 1938.

L. W. COOMBS
 PISTON SKIRT EXPANDER
 Filed Sept. 1, 1934

2,113,912

Fig. 1.

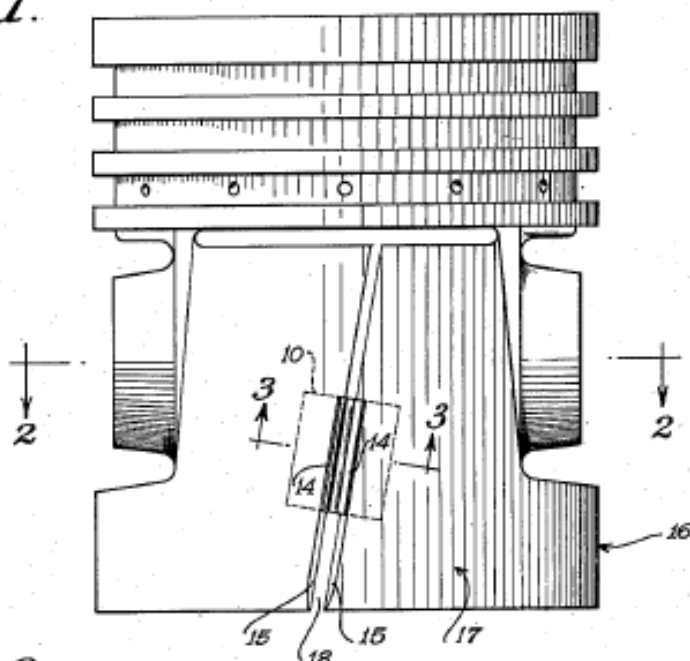


Fig. 2.

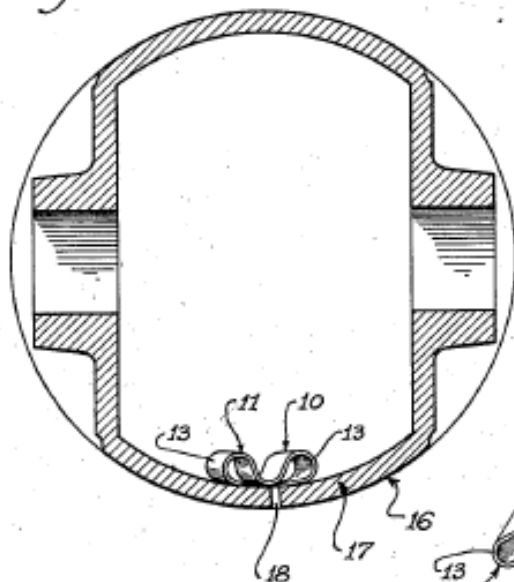


Fig. 3.

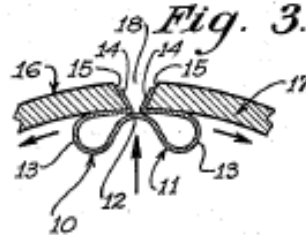
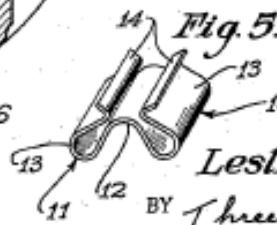


Fig. 4.



Fig. 5.



INVENTOR.
Leslie W. Coombs
 BY *Threedy and Cannon*
 HIS ATTORNEYS.

Příloha C

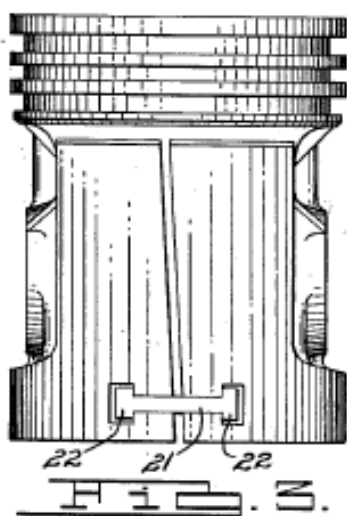
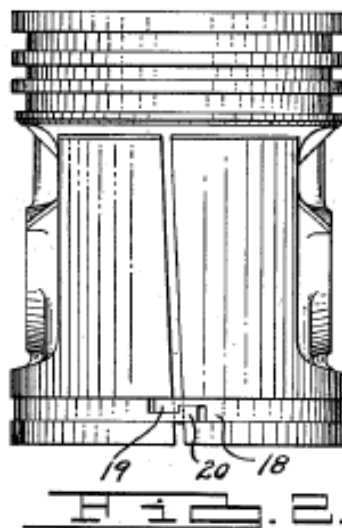
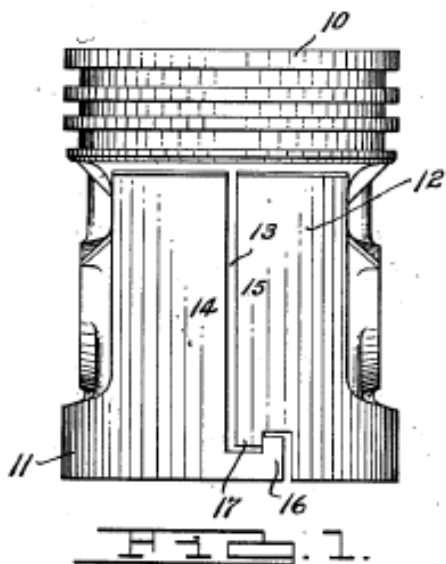
May 14, 1940.

A. L. NELSON

2,200,966

PISTON

Original Filed June 2, 1934



INVENTOR.
Adolph L. Nelson
BY
Ramsay, Kent, Chisholm and Lutz
ATTORNEY.

Příloha D

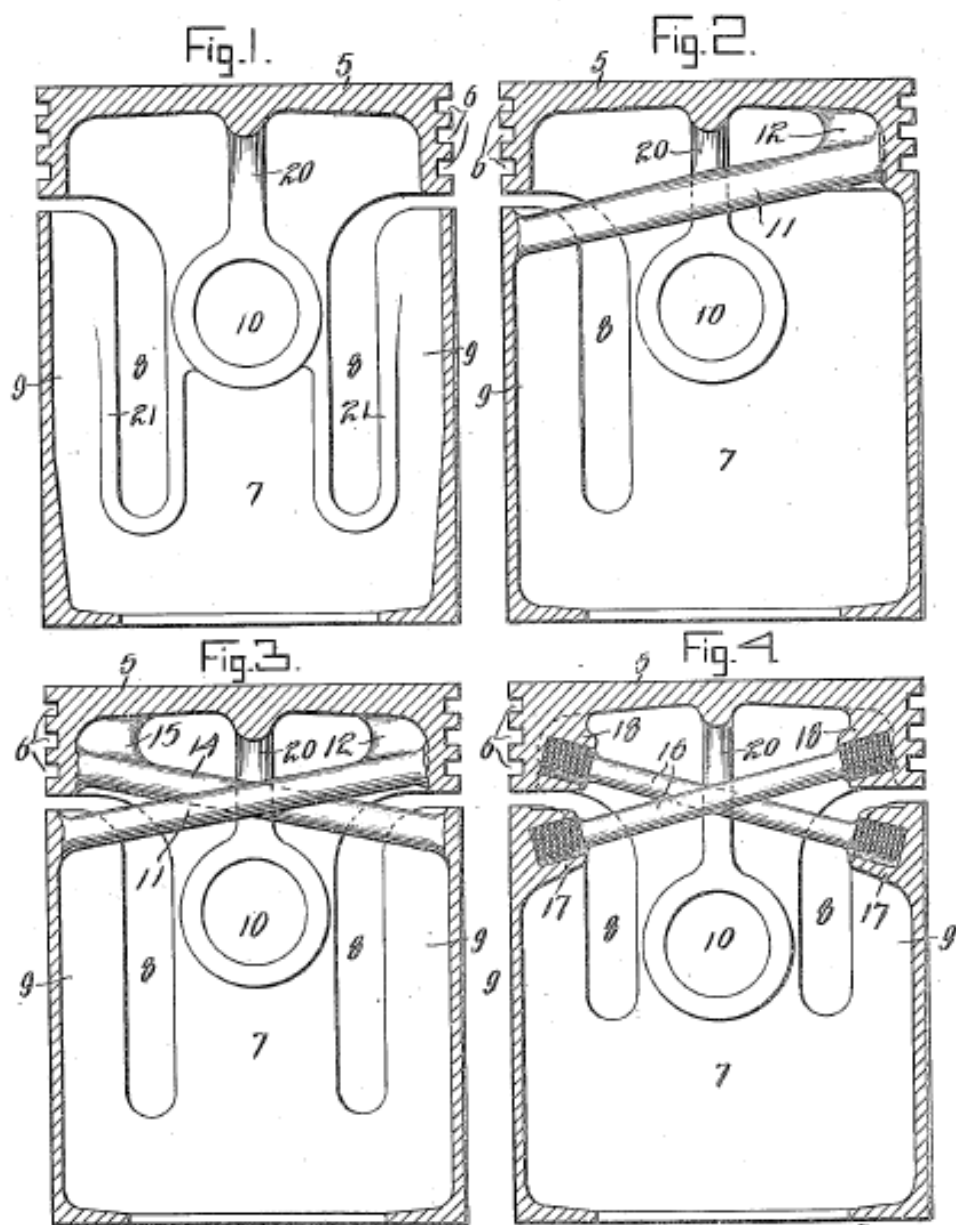
Aug. 14, 1923.

A. L. NELSON

1,465,144

PISTON

Filed March 7, 1921



Inventor
Adolph L. Nelson

By *Edw. Bradford*

Attorney

Aug. 30, 1938.

A. L. NELSON

2,128,662

PISTON

Original Filed June 8, 1925

2 Sheets-Sheet 1

